

EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

“El hidrógeno se postula como un combustible sintético que puede reemplazar al petróleo debido, en gran parte, a que su combustión no comporta emisión de óxidos carbonosos o nitrosos que afecten al medio ambiente.”

POR VÍCTOR M. ORERA

Motor de hidrógeno desarrollado por la marca automovilística BMW.

*Foto por www.Dream-car.tv (www.flickr.com)

El hidrógeno se postula como un combustible sintético que puede reemplazar al petróleo debido, en gran parte, a que su combustión, ya sea térmica en una caldera o en un motor de combustión interna o mediante oxidación electroquímica en una Pila de Combustible, no comporta emisión de óxidos carbonosos o nitrosos que afecten al medio ambiente. Por otra parte, este combustible puede ser producido mediante procedimientos "limpios" a partir de electricidad procedente de sistemas renovables, o incluso de la energía nuclear. A pesar de que persisten graves problemas asociados a la producción y almacenaje del hidrógeno aún no resueltos de forma satisfactoria, la mayor parte de las compañías automovilísticas han fabricado prototipos de automóviles movidos con hidrógeno de cara a su próxima comercialización. Siempre manteniendo en perspectiva la opción de los vehículos totalmente eléctricos e híbridos, que constituyen una fortísima competencia al vehículo de hidrógeno debido, en parte, a los

espectaculares avances recientes en la tecnología de las baterías de litio. A continuación, se discuten algunos aspectos relacionados con la utilización del hidrógeno como combustible.

EL PROBLEMA DE LA ENERGÍA

Desde que el hombre aprende a dominar el fuego, la utilización de los recursos energéticos ha estado íntimamente ligada al incremento de su calidad de vida y al de su desarrollo tecnológico. De hecho se puede establecer, tal como se presenta en la figura, una correlación entre el Producto Interior Bruto, PIB, y el consumo de energía primaria por habitante. Aunque con una dispar "eficiencia energética" entre las diversas regiones del planeta, de los datos de la figura se deduce una proporcionalidad entre riqueza y consumo de energía. La máxima intensidad energética, definida como la energía utilizada en la creación de riqueza y obtenida como el cociente entre energía consumida y unidad de PIB generados en cada país, está en torno a los

4-5.5 MJ/\$ en la Unión Europea y en los países con economías emergentes. Las sociedades menos eficientes energéticamente son Rusia (26MJ/\$), seguida de Canadá, Corea y China, quedando EEUU en un término intermedio en cuanto a eficiencia energética se refiere.

En concreto, los 6.614 millones de seres humanos que vivimos en este planeta en el año 2007 consumimos unos 510 x 10⁹ GJ, es decir, unos 12.000 millones de toneladas equivalentes de petróleo, de energía primaria, lo que equivale a unos 77 GJ de energía por persona y año.

El mayor problema de este ingente consumo radica en el hecho de que el 87.5% de la energía utilizada tiene origen fósil, es decir, procede del petróleo, carbón y gas natural. Además, el incremento anual de la población mundial en unos 80 millones de personas y el crecimiento económico de los países en desarrollo generan un incremento de más del 2.5% anual en las necesidades energéticas. Nuestra avidez de combustibles fósiles es tal que, a pesar de que el precio del petróleo se ha incrementado en casi un factor 10 desde 11 \$/baril en 1998 a 100\$/baril en 2008, el consumo sigue creciendo a una tasa interanual del 1%. Este crecimiento es aún mayor en el caso del gas natural, 3.1% por año, y de casi un 5% anual en el del carbón.²

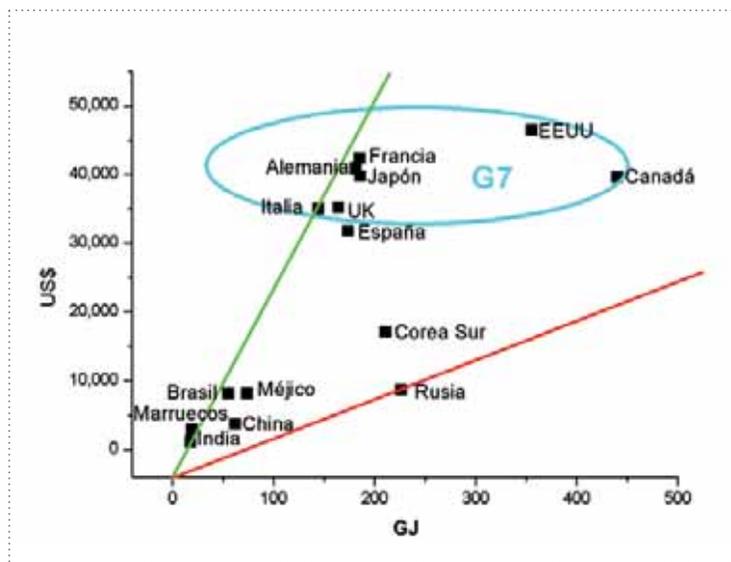
Dicho incremento produce una creciente presión sobre las reservas de combustibles fósiles, que se traduce en tensiones políticas e inestabilidad económica. Por otro lado, la quema masiva de combustibles fósiles y la emisión de contaminantes asociada a su consumo también producen efectos dañinos en el medio ambiente que, al parecer, pueden dar lugar a rápidos cambios en el clima a nivel global. A pesar de la mayor eficiencia de los sistemas energéticos modernos seguimos incrementando las emisiones a un ritmo que, en el caso del CO₂, se estima casi del 3% anual, con tendencia creciente en todo el mundo excepto en Europa y la antigua URSS.

“Desde que el hombre aprende a dominar el fuego, la utilización de los recursos energéticos ha estado íntimamente ligada al incremento de su calidad de vida y al de su desarrollo tecnológico.”

¿CUÁL ES NUESTRO HORIZONTE ENERGÉTICO?

Se estima que la producción de petróleo barato está actualmente en su máximo y, salvo fluctuaciones coyunturales en el binomio oferta-demanda, la extracción comenzará a decrecer y su precio a subir en un futuro inmediato. Algo parecido pasará con el gas natural aunque con más retraso, ya que el nivel de reservas de gas permiten mantener la tasa de extracción en los niveles actuales durante más tiempo. En España, este cambio de tendencia coincidirá con el fin de la vida útil de las centrales nucleares actuales, que sumi-

PIB por habitante (Renta per Cápita) frente a cantidad de energía primaria consumida por habitante en varios países incluidos las 7 primeras economías mundiales.¹



1. Los valores de PIB se refieren al año 2009 y han sido obtenidos a partir de los datos del Banco Mundial sobre el Producto Interior Bruto por países (<http://sitesources.worldbank.org/DATASTATISTICS/Resources/GDP.pdf>) y la población para ese mismo año (<http://sitesources.worldbank.org/DATASTATISTICS/Resources/POP.pdf>). Los valores del consumo de energía primaria corresponden a estimaciones para el año 2007 hechas por el Department of Energy de EEUU (<http://eia.doe.gov>).

2. Datos obtenidos del BP Statistical Review of World Energy, 2008 (<http://www.bp.com/productlanding.do?categoryId=6929&contentId=7044622>).

El hidrógeno como combustible

nistran el 20 % de la energía eléctrica, que a su vez constituye el 20% del consumo de energía final en nuestro país.³

Además, nuestro modelo de sociedad se basa en la persistencia del crecimiento económico continuo y hemos visto que éste, si bien con distintos valores de intensidad energética, se correlaciona con el consumo de productos energéticos y con la emisión de CO₂. El informe Stern⁴ establece que, con el actual sistema económico, la concentración de CO₂ en la atmósfera alcanzará valores de unas 550 ppm en 2050 y por encima de 650 ppm al final de siglo, y que, además, estas estimaciones son bastante robustas frente a ligeros cambios en el modelo actual de crecimiento. Existe un casi total consenso científico en que el ecosistema terrestre admite, como mucho, unos 500 ppm de CO₂ sin incurrir en graves riesgos de que se produzcan fuertes y rápidos cambios climáticos.

En consecuencia, hemos de asumir que la escasez a corto-medio plazo en los recursos energéticos y el elevado impacto medioambiental, que su utilización produce, constituyen uno de los principales, si no el primer problema, con el que la Humanidad se enfrenta. Hemos de ser conscientes de que los recursos energéticos que estamos utilizando son finitos y que además tenemos que buscar alternativas energéticas menos contaminantes.

¿CUÁLES SON LAS POSIBLES SOLUCIONES?

Una posible solución del problema pasaría por un cambio del actual sistema económico que hiciera compatible un cierto grado de bien-

estar con una disminución del ritmo de crecimiento. De hecho, existen estudios socioeconómicos que apuntan a que pudiera existir un máximo en el índice de desarrollo humano que estaría entorno a sus valores actuales en los países europeos y Japón de forma que un incremento en el PIB y/o en el consumo energético por habitante (casos de Canadá, USA o Rusia) no comportaría una mejora en dicho índice.⁵ No obstante, seamos conscientes de que esta situación de bienestar habría sido alcanzada solamente por una pequeña parte de la Humanidad con lo que, de acuerdo con el modelo económico actual, una mejora de esta situación pasaría necesariamente por un elevado incremento del consumo energético global.

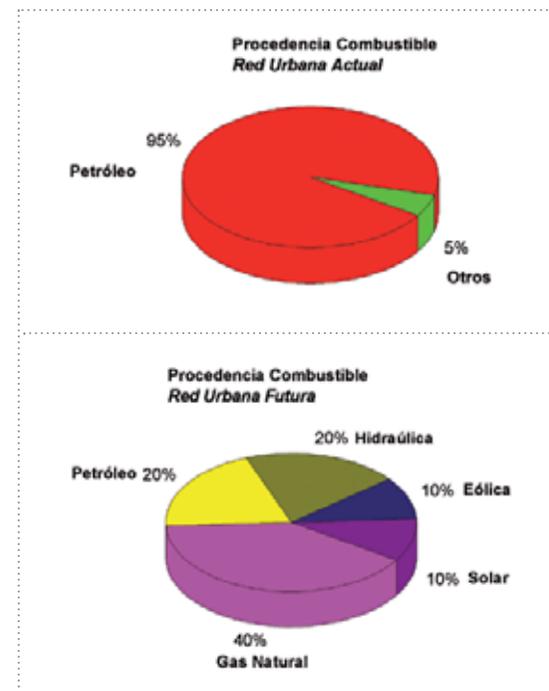
La apuesta más realista en estos momentos está en buscar soluciones tecnológicas que permitan sustituir a corto plazo los combustibles fósiles por otras fuentes de energía renovables, a la par que incrementar el rendimiento energético de nuestros sistemas actuales.⁶

En lo que respecta a la generación estacionaria de electricidad, todos conocemos los nuevos sistemas de producción de energía renovable. La eólica, de la que hay unos 14 GW de potencia instalada en España, viene a cubrir en torno al 12% de la producción lo que nos convierte en un país puntero en esta tecnología. La energía solar, tanto en la modalidad de producción fotovoltaica como en la

menos conocida de la solar térmica, tiene un potencial realmente ilimitado. Sin embargo, todas estas fuentes renovables presentan dificultades para su implantación a corto plazo como sustitutivas de los combustibles fósiles, tales como su carácter discontinuo o el que su puesta en marcha necesite de amplios espacios y grandes inversiones. La energía nuclear, que es una excelente alternativa que no incrementa la concentración de gases de efecto invernadero, tiene el inconveniente del rechazo social aparte de las enormes inversiones necesarias para su implantación máxime si se tiene en cuenta el coste asociado a la gestión de residuos y reciclaje de las instalaciones una vez acabada la vida útil de estas centrales.

¿Y EL TRANSPORTE?

El transporte utiliza aproximadamente el 40% de la energía primaria y en un 95% utiliza derivados del petróleo. Ello convierte a este sector en la fuente más intensa de emisión de CO₂ y otros gases nocivos, de ahí que se esté realizando un enorme esfuerzo para tratar de sustituir el uso actual de la gasolina y el gasoil por otros combustibles menos contaminantes. En la figura presentamos los diagramas que muestran



Distribución del combustible utilizado actualmente en transporte urbano y los objetivos del plan CUTE para el 2020.

el reparto de combustibles dedicados al transporte urbano en la U.E. actualmente y el futuro previsto en el plan CUTE (Clean Urban Transport for Europe). Observamos que se pretende pasar de una utilización actual del 95% de derivados del petróleo a otra más diversificada que reduzca esta dependencia al 20%.



Avión propulsado por un sistema híbrido de hidrógeno y combustible.

*<http://aisoftermations.blogspot.com>

3. Consultar: <http://www.foronuclear.org>.

4. El "Stern Review on the Economics of Climate Change" de 700 páginas de extensión fué encargado por el Gobierno Británico a Sir Nicolas Stern y publicado el 30 de octubre del 2006. Se puede encontrar en <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk>.

5. El índice de desarrollo humano, HDI, se calcula a partir de la esperanza de vida, niveles de educación y PIB. En 2009 España ocupaba el puesto 15 con un valor de 0.955 sobre 1. http://www.nationmaster.com/graph/eco_hum_dev_ind-economy-human-development-index.

El hidrógeno como combustible

El proyecto CUTE terminó en 2006 y fue reemplazado por el más ambicioso plan cuatrienal HyFLEET:CUTE en el que 33 autobuses movidos con H₂ y Pilas de Combustible (FC) y 14 con motor de combustión interna han sido fabricados y puestos en circulación por el consorcio Daimler-EvoBus en diversas ciudades europeas, entre ellas Madrid y Barcelona.⁷ Además de los autobuses, se han montado plantas de producción y suministro de hidrógeno, procedente de electrolisis, reformado de gas natural, etc. Al finalizar este proyecto se han transportado 8.5 millones de pasajeros y recorrido 2.160.000 Km, sin ningún accidente, habiéndose consumido 555 t de H₂ mediante más de 13.000 operaciones de repostaje.

Recién terminado el proyecto, las conclusiones a las que se ha llegado por parte del panel de expertos de la Comisión Europea, patrocinadora del proyecto, es que el hidrógeno puede efectivamente ser un combustible limpio para el transporte, y que las Pilas de Combustible ac-

“La energía solar tiene un potencial realmente ilimitado. Sin embargo, todas esas fuentes renovables presentan dificultades para su implantación a corto plazo como sustitutivas de los combustibles fósiles.”

tuales, FC (Fuel Cells), son un sistema práctico y fiable para la propulsión de vehículos. También se ha constatado que los actuales motores de combustión interna pueden adaptarse de forma fácil y barata a la utilización de hidrógeno como combustible. Asimismo se ha demostrado la fiabilidad, eficiencia y seguridad de los sistemas de producción de hidrógeno. Sin embargo quedan aún por solucionar importantes temas tales como el excesivamente elevado precio de los autobuses movidos con motor de FC así como el que la actual tecnología debe mejorar y ser más robusta para que se minimice la excesiva demanda de mantenimiento que actualmente necesitan tanto los autobuses de FC como los electrolizadores.

¿POR QUÉ HIDRÓGENO?

Hemos visto que los vehículos alimentados con hidrógeno se perfilan como una de las opciones más interesantes para intentar resolver el problema del transporte.⁸ Ello es debido a que el hidrógeno es el elemento químico más ligero de la naturaleza y a que su molécula tiene la energía de enlace por masa más elevada de entre todos los compuestos químicos. Posee, por lo tanto, la mayor densidad energética másica. Además, es un combustible cuya combustión solo produce energía y

agua y que se encuentra en forma prácticamente inagotable en el planeta, en forma de agua. En la tabla damos algunas propiedades del hidrógeno en comparación con otros combustibles de uso común.

El elevado poder calorífico y elevada densidad energética másica del hidrógeno, unido a la elevada eficiencia de las Pilas de Combustible, lo hacen óptimo para el transporte. En concreto, un automóvil estándar de 5 plazas, con un peso de 1.2 t carga unos 40 kg de combustible convencional para hacer 500 km. El mismo automóvil necesitará solo 5 Kg de hidrógeno si utiliza una Pila de Combustible y motor eléctrico o unos 10 kg si se alimenta con hidrógeno un motor de combustión interna. El problema es que esa masa de hidrógeno ocupa unos 56.000 l en condiciones normales y para reducirlo a un volumen manejable en un automóvil, es decir a unos 100 l, se necesita una presión de más de 100 MPa (unas 1000 atmósferas). Estos datos nos descubren uno de los principales inconvenientes del hidrógeno que es el de su difícil almacenamiento debido, en parte, a su pequeña densidad energética por unidad de volumen.

Uno de los microbuses de la Expo Zaragoza 2008, propulsado por un motor de hidrógeno.

*<http://blogdecarrlos123456.blogspot.com>



¿CÓMO PRODUCIR EL HIDRÓGENO?

Actualmente disponemos de varias formas de producir H₂ cuyas ventajas e inconvenientes se resumen en la tabla de la página 50. En particular, la forma más económica de producir hidrógeno es a partir del reformado de los hidrocarburos, que además se puede hacer "in situ" en el caso del transporte con lo que evitaríamos parcialmente el problema del almacenamiento del combustible. El reformado no impide, sin embargo, la emisión de gases dañinos. El método más limpio, y de una gran eficiencia para producir hidrógeno a partir de agua, es la electrolisis utilizando electricidad producida a partir de fuentes renovables, si bien el coste de la producción de hidrógeno mediante electrolisis⁹ de

	Hidrógeno	Gasolina	Metano
Poder calorífico (kJ/g)	145	43	50
Densidad gas (kg/Nm ³)	0.090		0.72
Densidad líquido kg/l	0.071	0.73	
Densidad energética (MJ/m ³ o l)	10.8	31.5 (l)	35.8 (l)
Emissiones CO ₂ (mg CO ₂ /kJ)	0	80	55

Propiedades del H₂ en comparación con la gasolina y el metano.

- El automóvil estándar europeo EURO4 emite 12.8kg de CO₂ por cada 100km mientras que ZEV (zero emission vehicle) con una pila PEMFC alimentada con hidrógeno comprimido emite 8.3g/100km. El rendimiento mecánico en el transporte de superficie es <25%. Del combustible consumido, menos de la cuarta parte se emplea en movimiento.
- Consultar: <http://www.global-hydrogen-bus-platform.com>.
- Schlappbach, L. "Hydrogen-fuelled vehicles" Nature, 460, 809 (2009).
- Laguna-Bercero, M.A., Campana, R., Larrea, A., Kilner, J.A., Orera, V.M., Performance and Aging of Microtubular YSZ-based Solid Oxide Regenerative Fuel Cells" Fuel Cells, DOI: 10.1002/uce.201000069.

El hidrógeno como combustible

agua refleja, directamente, el de la electricidad que depende mucho del método de producción, impuestos, etc. Actualmente, se está investigando muy activamente en la electrolisis a alta temperatura para aprovechar fuentes de calor superfluo con objeto de decrecer el consumo eléctrico de la electrolisis. En el otro lado de la moneda, tenemos el caso de la producción fotobiológica de hidrógeno mediante

cianobacterias, algas u otros microorganismos, cuyo recorrido es aún incierto ya que se trata de una tecnología en estado muy incipiente de investigación.

Desde el punto de vista de la investigación en Ciencia de Materiales, la fotocatalisis y la termólisis son las tecnologías que presentan un futuro más prometedor, si se avanza suficientemente en el descubrimiento de nuevos materiales aplicables a estas tecnologías (ver tabla).

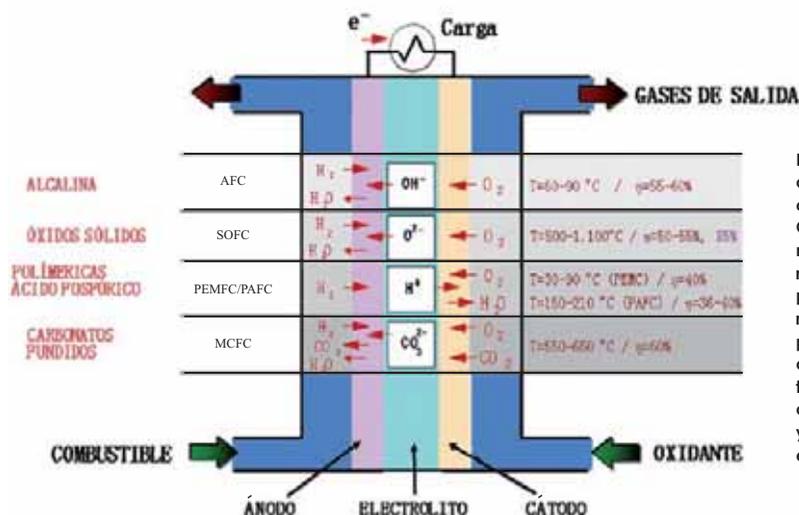
¿Y CÓMO ALMACENARLO?

Ya hemos apuntado que uno de los principales inconvenientes del hidrógeno es su carácter gaseoso en condiciones nor-

“Desde el punto de vista de la investigación en Ciencia de Materiales, la fotocatalisis y la termólisis son las tecnologías que presentan un futuro más prometedor.”

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Electrólisis	Tecnología conocida, eficiente y limpia. Genera H ₂ de alta pureza utilizable en FC poliméricas y motores de combustión interna.	Precio según factura eléctrica. En la UE cara. Más barata a alta temperatura.
Reformado de hidrocarburos	Tecnología bien conocida y eficiente. Bajo coste con gas natural.	Para evitar la contaminación hay que recoger el CO ₂
Gasificación de carbón o de biomasa	Puesta en valor del carbón y de los hidrocarburos pesados.	H ₂ muy sucio solo utilizable en SOFC. Recoger el SO _x y el CO ₂
Termólisis usando energía solar o energía nuclear	Potencialmente es un sistema de producción masiva y limpia que en el caso de la nuclear es suficientemente barata como para competir con el reformado.	Tecnología compleja que necesita de materiales de alta temperatura.
Fotocatalisis	Utiliza el efecto catalítico del TiO ₂ y otros semiconductores y la energía solar. Tecnología limpia.	Desarrollo a nivel de investigación. Sistema aún muy poco eficiente.
Fotobiología: algas, bacterias...	Potencial uso masivo y tecnología limpia.	Muy poco eficiente y en fase incipiente de estudio.

Ventajas e inconvenientes de las distintas tecnologías de producción de H₂.



Esquema de diferentes tipos de Pilas de Combustible mostrando los reactantes y los productos de reacción, iones portadores de carga, temperatura de operación y eficiencias energéticas.

males lo que unido a su elevada volatilidad y elevada inflamabilidad hace que su almacenamiento y transporte sea problemático. En la tabla de la página 52 resumimos los inconvenientes y ventajas de algunos de los sistemas de almacenaje de hidrógeno.

En la actualidad, casi todos los usuarios optan por el almacenaje en balas de presión o en depósitos de hidruros metálicos. Aunque el almacenamiento a alta presión está técnicamente resuelto, presenta algunos problemas de difícil solución ya que los contenedores son pesados y además el hidrógeno solo se comporta como un gas ideal hasta unos 10MPa de presión. Por encima de este valor, la relación presión-volumen deja de ser lineal y se necesita aún más presión para lograr una reducción equivalente de volumen. El futuro en el almacenaje del hidrógeno está en la adsorción de la molécula de hidrógeno en materiales altamente porosos. La adsorción se realiza habitualmente a LNT (temperatura del nitrógeno líquido, 77K) y para desprender el hidrógeno se eleva la temperatura del material. Con la técnica de adsorción-desorción se logra almacenar en torno a un 8%

en masa de hidrógeno. Para incrementar este porcentaje tan bajo se está investigando en nuevos sistemas más ligeros, alanatos, borohidruros, etc y en sistemas porosos tales como los materiales carbonosos o las zeolitas (aluminosilicatos) en los que la superficie de los poros haya sido recubierta con complejos organometálicos o moléculas orgánicas que atraigan los átomos de hidrógeno.¹⁰

¿CÓMO UTILIZAR EL HIDRÓGENO?

El hidrógeno puede utilizarse directamente o mezclado con otros hidrocarburos en un motor de combustión interna convencional. Sin embargo, su mayor potencialidad como combustible con alto valor energético y limpio se desarrolla cuando se utiliza para alimentar una Pila de Combustible. Una FC es un sistema de transformación de energía que produce electricidad a partir de la energía química de un combustible que se suministra de forma continua, mediante un proceso electroquímico (ver Figura). Consiste en una membrana, conductora iónica y estanca a los gases reactantes (elec-

El hidrógeno como combustible

trolito) recubierta por dos electrodos conductores eléctricos e iónicos. Los electrodos pueden ser conductores mixtos o materiales porosos y en ellos se sitúan los catalizadores de las reacciones de oxidación, ánodo, y reducción, cátodo. Los distintos tipos de FC corresponden a los de los electrolitos empleados así como su temperatura de operación. Las de electrolito polimérico, PEM, se cuentan por centenares de miles y se utilizan en transporte. Las alcalinas, AFC, o de ácido fosfórico, PAF, tienen aplicaciones aeroespaciales y militares. Todas ellas trabajan a temperaturas menores que 210°C y utilizan como catalizadores nanopartículas de Pt o sus aleaciones con Rh y Ru. Son bastante eficientes, desde el punto de vista energético, pero requieren como combustible hidrógeno de elevada pureza, <1 ppm de CO.

Sin embargo, las Pilas de alta temperatura, de óxido sólido, SOFC, o de carbonatos fundidos, MCFC, presentan una eficiencia energética inigualable, > 80% con cogeneración, catalizadores baratos de Ni, Co o incluso Fe y flexibilidad, al uso, de diversos combustibles incluso hidrocarburos.¹¹ La alta temperatura de operación introduce dificultades en la duración y coste de los materiales que las forman.

RESUMEN

Seguramente, y a pesar de su perfecta implantación en el sistema económico actual, el uso de combustibles fósiles tiene sus días contados. No obstante, la alternativa a la gasolina y al diesel no está del todo clara. Los nuevos tipos de baterías recargables de litio o de hidruros metá-

licos han abierto el mercado al automóvil totalmente eléctrico o híbrido, pero volvemos a encontrarnos con la escasez en las materias primas necesarias para fabricar estas baterías, y con el hecho de que al pasar al automóvil eléctrico tendríamos, al menos, que duplicar nuestros sistemas actuales de producción y distribución de electricidad. Lo mismo ocurriría si optáramos por el hidrógeno. Solamente en España necesitaríamos unas 10.000 hidrogeneras y unos 30 GW eléctricos extras para producir y distribuir el hidrógeno que consumiría nuestro parque de transporte. Estas ingentes inversiones trascienden las capacidades económicas del sector público y solo se llevarán a cabo cuando la iniciativa privada vea claro el negocio o vea negro el futuro económico inmediato. Mientras tanto, los técnicos y científicos tenemos mucho trabajo que hacer para descubrir nuevos materiales más eficientes, baratos y resistentes que puedan ser utilizados en la producción, transporte y almacenamiento de energía. La pregunta es si ganaremos esta carrera contra el tiempo o la Humanidad se verá abocada al llamado "apagón energético" que algunos pesimistas vaticinan.

“Seguramente, y a pesar de su perfecta implantación en el sistema económico actual, el uso de combustibles fósiles tiene sus días contados.”

Motor de hidrógeno Ford V-10.

*www.drivingenthusiast.net



TECNOLOGÍA	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Almacenamiento a alta presión >250 bares	Tecnología conocida.	Elevado peso de los contenedores, válvulas y conductos. Problema de seguridad debido a la presión.
Hidrógeno líquido	Elevada densidad energética y corto tiempo de recarga.	El proceso de licuación consume un 30% de la energía almacenada. Problemas de seguridad frente a rotura del contenedor.
Reformado "in situ" de hidrocarburos para producir H ₂ que alimenta una FC	Densidad comparable a la del sistema convencional. El sistema reformado + Pila es más eficiente.	Hay que recoger el CO ₂
Quimisorción: Hidruros metálicos	Potencialmente es el mejor sistema de almacenaje. Los hidruros de LaNi ₅ y Mg ₂ Ni son muy prometedores a temperatura ambiente.	Baja capacidad de almacenamiento y cinética lenta. Falta de estabilidad.
Fisorción: Materiales carbonosos, C-activo, fullerenos, nanotubos, zeolitas.	Son materiales muy ligeros y estables.	Rendimientos de almacenaje muy bajos.

Análisis comparativo de algunos de los sistemas de almacenaje de hidrógeno más simples.

Víctor M. Orera

Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

10. Harris, I.R., Book, D., Anderson, P.A., Edwards, P.P. "Hydrogen Storage: the grand challenge. Fuel Cell Rev. 1, 17 (2004).

11. Handbook of Fuel Cells, Fundamentals, Technology and Applications" Ed. By Vielstich, W., Lamm, A. and Gasteiger, H.A. John Wiley & Sons Ltd., England, 2003. ISBN: 0-471-49926-9.